

*На правах рукописи*



**Малази Самуэль Али**

**МОДЕЛИРОВАНИЕ РАДИАЦИОННО - КОНВЕКТИВНОЙ СУШКИ  
КАЗЕИНА С УЧЕТОМ ИЗМЕНЕНИЙ ТЕПЛОМАССОБМЕНА И  
РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ**

Специальность: 05.18.12 – Процессы и аппараты  
пищевых производств

**АВТОРЕФЕРАТ**  
**диссертации на соискание ученой степени**  
**кандидата технических наук**

Москва – 2021

Работа выполнена на кафедре ресторанного бизнеса федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский экономический университет имени Г.В. Плеханова», г. Москва.

Научный руководитель	доктор технических наук, доцент <b>Беляева Марина Александровна</b>
Официальные оппоненты:	<b>Орешина Марина Николаевна</b> , доктор технических наук, ФГБОУ ВО «Государственный университет управления», доцент кафедры информационных систем  <b>Будрик Владислав Глебович</b> , кандидат технических наук, Всероссийский научно-исследовательский институт птицеперерабатывающей промышленности – филиал ФНЦ «ВНИТИП» РАН, директор
Ведущая организация	федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный центр пищевых систем им. В.М. Горбатова» РАН

Защита состоится 1 марта 2022 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета Д 212.196.07 на базе ФГБОУ ВО «РЭУ им. Г.В. Плеханова» по адресу: 117997, г. Москва, Стремянный пер., д. 36, корп. 3, ауд. 353.

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в Научно-информационном библиотечном центре им. академика Л.И. Абалкина ФГБОУ ВО «РЭУ им. Г.В. Плеханова» по адресу: 117997, г. Москва, ул. Зацепа, д. 43 и на сайте организации: <http://ords.rea.ru/>

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2022 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

доктор химических наук, профессор



Чалых Татьяна Ивановна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Производство молочных продуктов играет большую роль в решении задач полноценного удовлетворения потребностей населения в высококачественных пищевых продуктах.

В молочной промышленности важное значение приобретают исследования и разработка новых методов термообработки, консервирования и хранения. К таким методам относится сушка. Проблема сушки молочных продуктов в настоящее время рассматривается по разным направлениям: аналитические методы исследования кинетики сушки, моделирование и оптимизация процессов тепло-массообмена, развитие технологии и техники сушки, создание высокопроизводительных сушильных аппаратов. Для совершенствования радиационно-конвективной сушки казеина необходимо учитывать, что целью сушки является не только выбор оптимального режима, но и повышение эффективности сушки и улучшение качества продукта. В настоящее время для производства казеина используются различные сушильные аппараты с высоким энергопотреблением, поэтому исследование, направленное на разработку новых высокоэффективных сушилок, повышающих эффективность процесса сушки казеина на основе моделирования процессов влаго- и теплопереноса, является актуальной задачей.

**Степень разработанности темы.** Вопросами технологии производства и сушки казеина занимались как отечественные так и зарубежные ученые: К.К.Горбатова, Н.Н.Липатов, Г.А.Барышев, Ф.Гауровиц, П.Ф.Дьяченко, Р.Раманаускас, О.В.Дымар, В.С.Трофимов, В.М.Арапов, К.К.Полянский, С.Т.Антипов, В.Н.Шаршов, М.А.Громов, В.Ф.Данилин, А.А.Соколов, Л.Я.Фадеева, Г.Р.Цыдендоржиева, И.Н.Шуманис, В.Е.Куцакова, А.Ю.Просеков, Л.М.Архипова, В.А.Ермолаев, М.Г.Курбанова, M.Carie, A.M.Mocanua, J.Wang, P.Whiteley, D.Jones, W.Cabot, de C.G.Kruif, L.M.Diamante, E.Dickinson, M.P.Ennis, C.Guo, B.E.Campbell, K.Chen, A.M.Lenhoff, O.D.Velev, V.K.Gupta, C.R.Southward, H.Zegota, B.Malolepszy, J.Pisecky, H.Schubert.

Вместе с тем, исследования, направленные на разработку радиационно-конвективных сушилок, повышающих эффективность процесса сушки казеина, моделирование процессов теплообмена, оптимизация и исследование сушки казеина на основе системного анализа не проводились, поэтому данное направление является перспективным и инновационным.

### **Цель и задачи исследования.**

Целью диссертационной работы является разработка и моделирование радиационно-конвективного способа сушки казеина, позволяющего снизить энергопотребление и повысить эффективность сушки, улучшить качество продукта.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи исследований:

- системно-аналитическое исследование процесса сушки казеина;
- построение иерархической структуры радиационно-конвективной сушки;
- разработка физической модели сушки при комбинированном инфракрасном и конвективном нагреве;
- построение структурно-параметрической модели процесса сушки казеина;
- моделирование и оптимизация радиационно-конвективной сушки казеина;
- моделирование радиационно-конвективной сушки казеина с использованием критериев подобия теплообмена;
- разработка математических моделей для решения задачи тепло-массообмена процесса сушки;
- практическая реализация результатов исследований радиационно-конвективной сушки казеина в производственных условиях.

#### **Научная новизна работы.**

- Разработан радиационно-конвективный способ процесса сушки казеина;
- предложена многоуровневая иерархическая структура системных исследований процесса сушки казеина;
- разработана структурно-параметрическая модель сушки казеина для прогнозирования и оптимизации эффективности процесса;
- разработаны математические модели, позволяющие определить рациональные параметры режима сушки и оптимальные конструктивные решения при проектировании сушильных аппаратов;
- разработаны математические модели для решения задач тепло-массообмена сушки казеина;
- разработаны проектные конструктивные решения конвективной ленточной сушилки, установок виброаэрокипящего и фонтанирующего слоя с комбинированным инфракрасным подводом теплоты, позволяющие повысить эффективность процесса сушки казеина.

#### **Практическая значимость работы.**

- Определены оптимальные режимы процесса сушки казеина при комбинированном инфракрасном и конвективном нагреве;
- разработаны математические модели для решения задач тепло-массообмена в первый и второй периоды сушки;
- результаты теоретических и экспериментальных исследований использованы для разработки оптимальных режимов сушки;
- предложены конструктивные решения по разработке радиационно-конвективных сушилок;
- научные и прикладные результаты исследований позволили разработать рекомендации для внедрения рациональных параметров и конструкций радиационно-конвективных устройств для сушки казеина в промышленном производстве;

- получен патент № 2743871 Российская Федерация «Шкаф для инфракрасной сушки национального кисломолочного продукта курт»;
- на разработанный способ комбинированной инфракрасной и конвективной сушки казеина оформлена заявка № 2020133195 от 08.10.2020 на патент Российской Федерации «Способ комбинированной инфракрасной и конвективной сушки казеина».

#### **Положения, выносимые на защиту:**

- Способ радиационно-конвективной сушки казеина;
- структурно-параметрическая модель радиационно-конвективной сушки казеина;
- результаты экспериментальных исследований радиационно-конвективной сушки казеина по критериям подобия теплообмена;
- математические модели распределения влажности и температуры в слоях казеина и горячего воздуха в первый и второй периоды сушки;
- рекомендации по разработке конструкций высокоэффективных сушильных аппаратов и управлению режимными параметрами сушки

#### **Апробация результатов исследования.**

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих научных конференциях: третья Международная научно-практическая конференция «Современные инновационные технологии в экономике, науке, образовании» Москва, 18 ноября 2019 г.; пятая Международная научно-практическая конференция «Экономически эффективные и экологически чистые инновационные технологии» Москва, 20 марта 2019 г.; Международная конференция «Инновации: перспективы, проблемы, достижения» Москва, 28 марта 2018 г.; вторая Международная научно-практическая конференция «Современные инновационные технологии в экономике, науке, образовании» Москва, 17 октября 2018 г.; Международная конференция «Траектории развития» Москва, 20 декабря 2017 г.

По теме диссертации опубликовано 16 печатных работ, в т.ч. три статьи в рецензируемых изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией России, одна статья индексирована в международной базе цитирования SCOPUS, одна статья индексирована в международной базе индекса научного цитирования web of science, получен патент и оформлена заявка на патент.

#### **Структура и объем диссертации.**

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы и приложения. Работа изложена на 190 страницах, включающих 61 рисунок и 47 таблиц. Список литературы включает 175 наименований российских и зарубежных источников.

#### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, определена цель исследований, охарактеризована научная новизна и

практическая ценность полученных результатов, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** рассмотрена характеристика казеина как объекта сушки (состав и свойства казеина, технология производства казеина), проведен обзор научной литературы, посвященной теоретическим и экспериментальным исследованиям в области сушки, описаны современные конструкции сушильных аппаратов периодического действия и приведены существующие методики их расчета.

**Во второй главе** рассмотрена методология системного анализа и моделирование радиационно - конвективной сушки казеина.

Эффективность процесса сушки казеина обуславливается влиянием множества параметров и факторов: характеристика сушильного аппарата, физико-химические свойства влажного продукта и качество готового продукта.

Основу процесса сушки казеина составляют технологические параметры режима обработки, физико-химические и структуро-механические процессы в продукте. Именно эти параметры и технологические показатели позволяют получить сухой казеин с присущими ему технологическими свойствами. Поэтому для решения задачи моделирования и оптимизации процесса сушки казеина с прогнозированием его качества необходимо рассматривать процесс как многоуровневую иерархическую структуру, состоящую из взаимосвязанных между собой элементов и явлений. Для этого использован системно-аналитический подход к исследованию процесса сушки казеина.

Физика процесса сушки кислотного казеина при комбинированном инфракрасном и конвективном нагреве заключается в воздействии тепловых потоков ИК - генератора и потока горячего воздуха на объект сушки (казеин). Физическая модель процесса сушки казеина при комбинированном инфракрасном и конвективном нагреве показана на рис. 1. При разработке физической модели предполагали, что:

- внутренняя площадь поверхности ограждений сушильной камеры ( $S_{ап}$ ),  $м^2$ ;

- в камере находится  $n$  влажного казеина в форме пластины толщиной ( $R$ ) м, с начальным влагосодержанием ( $w_0$ ) кг/кг и начальной температурой ( $t_n$ ) °С;

- масса влажного казеина в камере ( $G_{вл.п} = V_{вл.п} \times \rho_{вл.п}$ ) кг, где плотность влажного казеина ( $\rho_{вл.п}$ ) кг/м<sup>3</sup>, ( $V_{вл.п}$ ) его объем;

- масса влажного воздуха в камере ( $G_в = V_в \cdot \rho_в$ ) кг, где плотность влажного воздуха ( $\rho_в$ ) кг/м<sup>3</sup>, ( $V_в$ ) его объем ;

- влагосодержание влажного воздуха в камере ( $x_0$ ) кг/кг, с начальной температурой ( $t_0$ ), °С ;

– влажный воздух, поступающий в камеру, содержит ( $L_B$ ) кг/с, абсолютно сухой воздух ( $L_B$ ) кг/с;

– влагосодержание воздуха перед основным калорифером ( $x_1$ ) с температурой ( $t_1$ ), влажный воздух нагревается в наружном калорифере до температуры ( $t_2$ ) °С и подается в камеру;

– в камере находятся лампы с нихромовой спиралью со степенью черноты окисленного нихрома ( $\varepsilon_1 \approx 0,85$ ), стекла ( $\varepsilon_2 \approx 0,82$ ).

Инфракрасное излучение передается от нагревательных элементов к поверхности казеина, при этом лучистая энергия проникает в казеин и превращается в тепловую, т.е происходит тепло и влагоперенос в камере, на поверхности и внутри казеина.

Уравнение теплового баланса теплопереноса при инфракрасном нагреве:

$$dQ_{\text{пог}} = dQ_{\text{вл.п.из}} + dQ_{\text{исп}} + dQ_{\text{в.из}}, \quad (1)$$

где  $dQ_{\text{пог}}$  – тепло, поглощенное казеином при облучении, Дж;

$dQ_{\text{вл.п.из}}$  – расход тепла на нагрев казеина, Дж;

$dQ_{\text{исп}}$  – расход тепла на испарение влаги с казеина, Дж;

$dQ_{\text{в.из}}$  – потери теплоты нагреваемым казеином в окружающую среду, Дж.

Тепло, поглощенное казеином при облучении за время  $d\tau$ :

$$dQ_{\text{пог}} = q \times S_{\text{вл.п}} \times d\tau. \quad (2)$$

При известной плотности теплового потока излучателя ( $q_{\text{пад}}$ ) Вт/м<sup>2</sup>, запишем, тогда

$$dQ_{\text{под}} = \varpi \times q_{\text{пад}} \times S_{\text{вл.п}} \times d\tau, \quad (3)$$

где  $\varpi$  – коэффициент поглощения;

$S_{\text{вл.п}}$  – площадь части казеина облучаемой поверхности, м<sup>2</sup>.

Расход теплоты на нагрев казеина

$$dQ_{\text{вл.п.из}} = G_{\text{п.из}} \times c_{\text{п.из}} \times dt_{\text{вл.п}}, \quad (4)$$

где  $G_{\text{вл.п}}$  – масса казеина в камере, кг;

$c_{\text{вл.п}}$  – теплоемкость влажного казеина, Дж/(кг·К);

$dt_{\text{вл.п}}$  – изменение температуры казеина при ИК– излучении, °С.

Расход теплового потока на испарение влаги с казеина

$$dQ_{\text{исп}} = j \times r^* \times S_{\text{вл.п}} \times d\tau, \quad (5)$$

где  $j$  – интенсивность испарения влаги, кг/(м<sup>2</sup>·с);

$r^*$  – удельная теплота парообразования влаги, Дж/кг.

Потери теплоты нагреваемым казеином в окружающую среду:

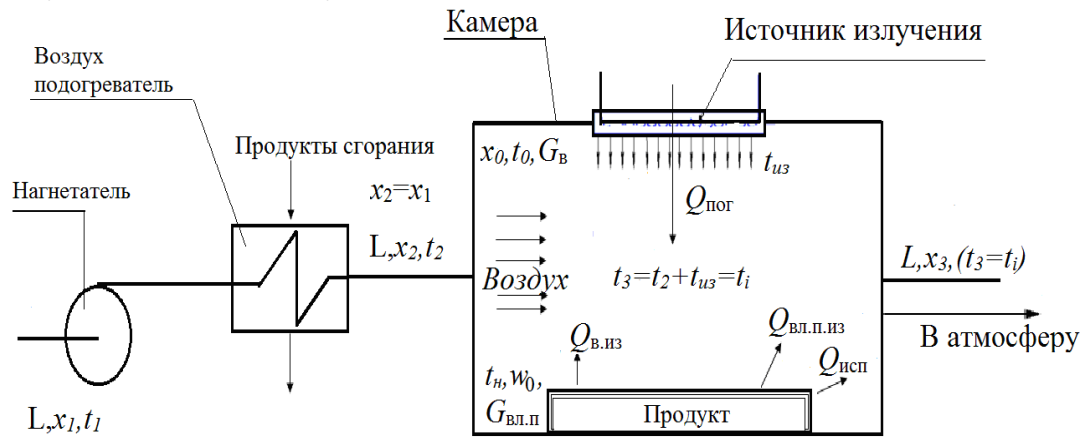
$$dQ_{\text{в.из}} = \alpha_{\text{общ}} \times (t_{\text{пов.п}} - t_{\text{ок}}) \times S_{\text{вл.п}} \times d\tau, \quad (6)$$

где  $\alpha_{\text{общ}} = \alpha + \alpha_{\text{изл}}$ ,  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи конвекцией, Вт/(м<sup>2</sup>·К).

$\alpha_{\text{общ}} = 18 - 24$  Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$t_{\text{пов.п}}$ ,  $t_{\text{ок}}$  – температуры поверхности казеина и воздуха окружающего казеина.

Теплота, поглощенная продуктом от излучателя (за время  $d\tau$ ) и теплота, подводимая с нагретым воздухом, расходуется на нагрев влажного продукта, а также теряется в окружающую среду с отработанным воздухом. Температура ( $t_i$ ) воздуха в любой точке сушильной камеры (температура воздуха, перемешивающего и температура нагретшегося воздуха при ИК - излучении) равны температуре влажного воздуха на выходе из установки, влагосодержание воздуха в конце сушки равно влагосодержанию  $x_3(\tau)$  воздуха на выходе из установки.



**Рисунок 1 – Физическая модель процесса сушки казеина при комбинированном инфракрасном и конвективном нагревах**

В результате многоуровневого анализа сушки казеина при комбинированном инфракрасном и конвективном нагреве разработали структурно-параметрическую модель сушки казеина. Структурно-параметрическое описание сушки представлено в матричной форме: показатели поступающего влажного казеина, характеристики сушильного аппарата, параметры режима сушки, физико-химические показатели сухого казеина, органолептические показатели сухого казеина. Для радиационно-конвективной сушки казеина фрагмент матричной модели связей между факторами методами экспертных оценок и факторного анализа показан в таблице 1.

Для описания радиационно-конвективной сушки казеина и выявления связей между факторами использовались данные проведенных многократных экспериментов (табл. 1), а при отсутствии каких-либо недостающих данных о связи между факторами, связи были установлены с помощью опроса экспертов (в табл. 1 символ\* означает наличие связи между факторами).

Связи между факторами могут быть установлены с помощью коэффициентов регрессии и корреляции (в табл. 1 символ (+) означает открытые данные в результате анализа, (-) означает неподтвержденные данные).

Пустые клетки предполагают возможность априорно неизвестных или нулевых характеристик влияния. Для сопоставимой оценки отклонений и связей параметров различной физической природы коэффициенты регрессии пересчитываются в безразмерные.



Таблица 1 – Фрагмент экспертных и статистических характеристик связей в структурно-параметрической модели сушки казеина

Параметры состояния	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$	$X_7$	$X_8$	$X_9$	$X_{10}$	$X_{11}$	$X_{12}$	$X_{13}$	$X_{14}$	$X_{15}$
<b>Параметры влажного казеина</b>															
1. Начальная температура $X_1, ^\circ\text{C}$	1														
2. Предельное напряжение сдвига казеин $\theta_0''$ а, Па, $X_2$	*	1													
3. Содержание влаги, % $X_3$ ,	*		1												
4. Кислотность казеина, $^\circ\text{T}$ , $X_4$				1											
5. Органолептические показатели, балл, $X_5$			(-)		1										
<b>Параметры режима радиационно-конвективной сушки</b>															
6. Плотность лучистого потока, кВт/м <sup>2</sup> , $X_6$	*					1									
7. Температура теплоносителя $^\circ\text{C}$ , $X_7$	*		(-)				1								
8. Время процесса сушки $\tau$ , мин, $X_8$	*		(+)	(-)		*	(-)	1							
9. Энергозатраты, кВт·ч/кг, $X_9$			(+)	(-)	*	*	(-)	(+)	1						
10. Толщина образца, см, $X_{10}$	*				(+)			(-)	(-)	1					
11. Расстояние от продукта до излучателей $h$ , см, $X_{11}$	(+)			(+)								1			
<b>Показатели сухого казеина</b>															
12. Органолептические показатели, балл, $X_{12}$	(+)	*	*	(+)	*	*	*	*	*	*	(+)	1			
13. Содержание белка, %, $X_{13}$	(+)	(-)	*		(+)		*	*		*		*	1		
14. Эффективная вязкость раствора казеина (20 %), Па·с $X_{14}$	*	*	*	(+)	(+)	(+)	(+)	(-)	(-)		*	*		1	
15. Содержание влаги, % $X_{15}$	(+)	(-)	*	*	(+)	*	*	*	*	*	*	*	(+)		1
Примечания															
* означает наличие связи между факторами															
(+) означает вскрытые данные в результате анализа															
(-) означает неподтвержденные данные															

На основе экспериментальных данных (табл.2) определили коэффициенты корреляции и составили их в виде матрицы:

$$r_{ij} = \frac{1}{m-1} \times \sum_{k=1}^m \frac{(x_{ki} - \bar{x}_i)}{S_{x_i}} \times \frac{(x_{kj} - \bar{x}_j)}{S_{x_j}}, \quad (7)$$

где  $\bar{x}_i, \bar{x}_j$  – среднее значение  $i$ -го и  $j$ -го факторов в  $k$ -м опыте;

$S_{x_i}, S_{x_j}$  – среднеквадратичные отклонения соответствующих факторов.

Для описания связей между коррелируемыми факторами определили коэффициенты линейной множественной регрессии:

$$\Delta x_i = \sum_{j=1}^{n_i} p_{ij} \times \Delta x_j, j = \overline{1, n} \quad (8)$$

и составили их в виде регрессионной матрицы  $P_{ij}; i, j = \overline{1, n}$ .

Для определения сопоставимых оценок отклонений и связей параметров режима сушки матрицу коэффициентов регрессии пересчитали в матрицу безразмерных сопоставимых характеристик

$$C_{ij} = \frac{p_{ij} \times \Delta x_j^0}{\Delta x_i^0}, i, j = \overline{1, n}, \quad (9)$$

где  $\Delta x_i^0$  и  $\Delta x_j^0$  – допустимые отклонения от норм.

Найденные коэффициенты записываются в регрессионную матрицу  $P_{ij}; i, j = \overline{1, n}$ .

По найденной матрице взаимосвязей и  $\Delta x_1, \dots, \Delta x_n$  путем умножения матрицы  $\|C_{ij}\|^n$  на  $\Delta x_j \delta_{jk}$  диагональную матрицу отклонений получаем *ситуационную матрицу*:

$$\begin{pmatrix} 1 & c_{12} & \dots & c_{1n} \\ c_{21} & 1 & \dots & c_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ c_{n1} & c_{n2} & \dots & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \Delta x_1 & & & \\ & \Delta x_2 & & \\ & & \dots & \\ & & & \Delta x_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Delta x_1 & c_{12} \Delta x_2 & \dots & c_{1n} \Delta x_n \\ c_{21} \Delta x_1 & \Delta x_2 & \dots & c_{2n} \Delta x_n \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ c_{n1} \Delta x_1 & c_{n2} \Delta x_2 & \dots & \Delta x_n \end{pmatrix} \quad (10)$$

Таблица 2 – Показатели и свойства влажного и сухого казеина и интервал варьирования параметров

Показатели и свойства влажного и сухого казеина и интервал варьирования параметров		
<i>Параметры влажного казеина</i>		
$X_1$	Начальная температура, °С.	20–25
$X_2$	Предельное напряжение сдвига казеина $\theta_0^n$ , Па	9,7–10,5
$X_3$	Исходное содержание влаги, процент.	68–72
$X_4$	Органолептические показатели, балл.	4,5–5,0
$X_5$	Кислотность казеина, °Т.	220–227
<i>Параметры режима радиационно-конвективной сушки</i>		
$X_6$	Плотность лучистого потока, кВт/м <sup>2</sup> .	2,02–3,97
$X_7$	Температура теплоносителя, °С.	100–180
$X_8$	Продолжительность сушки $\tau$ , мин.	155–168
$X_9$	Энергозатраты, кВт·ч/кг.	2,19–2,42
$X_{10}$	Толщина образца, см	0,4–1,2
$X_{11}$	Расстояние от объекта сушки до излучателей $h$ , см	10–20
<i>Показатели сухого казеина</i>		
$X_{12}$	Органолептические показатели, балл	4,5–5,0
$X_{13}$	Содержание белка, процент.	84–86
$X_{14}$	Эффективная вязкость раствора казеина (20 %), Па·с	5,25–47,90
$X_{15}$	Содержание влаги, процент.	11–12

Таким образом, ситуационная модель позволяет решить задачу диагностирования аномальной ситуации радиационно-конвективной сушки казеина, компьютеризировать диагностику и прогнозирование состояния процесса сушки, обеспечить компьютерный контроль и управление радиационно-конвективной сушкой с принятием оптимальных решений, определить оптимальные параметры режима сушки, найти оптимальные конструктивные решения при проектировании сушильного аппарата.

Для обоснования оптимальных параметров режима сушки казеина при инфракрасном и конвективном нагреве, эксперименты сушки были планированы методом многофакторных экспериментов и получены обобщенные уравнения сушки казеина:

$$A=1/4,18^3 \times (4,856-0,088x_1+0,00272x_1^2) \times (5,082-2,487x_2+1,505x_2^2) \times (2,735+1,320x_3-0,261x_3^2), \quad (11)$$

$$Q=1/3,39^4 \times (3,497-0,020x_1+0,00086x_1^2) \times (5,0611-3,393x_2+1,502x_2^2) \times (0,291+2,711x_3-0,525x_3^2) \times (22,65-0,265x_4+0,00087x_4^2), \quad (12)$$

$$\tau=1/152,3^4 \times (160,024-1,243x_1+0,0463x_1^2) \times (222,41-139,25x_2+59,659x_2^2) \times (2,1503+128,63x_3-24,603x_3^2) \times (951,46-10,95x_4+0,0360x_4^2), \quad (13)$$

$$P=1/54,57^2 \times (30,385+66,69x_2-39,63x_2^2) \times (90,72-30,82x_3+5,922x_3^2), \quad (14)$$

где  $x_1$  – расстояние от объекта сушки казеина до излучателей  $h$ , см;

$x_2$  – толщина образца, см;

$x_3$  – плотность ИК– теплового потока  $q_{из}$ , кВт/м<sup>2</sup>;

$x_4$  – температура горячего воздуха, °С.

Для разработанных обобщенных уравнений процесса сушки казеина (11), (12), (13) и (14) были определены коэффициенты корреляции и критерии значимости:

– для обобщенного уравнения показателя качества сухого казеина (12 %)

$A$  – коэффициент корреляции ( $R = 0,96$ ) и критерий значимости ( $t_R = 25,9$ );

– для обобщенного уравнения расхода энергии  $Q$  – коэффициент корреляции составляет ( $R = 0,95$ ) и критерий значимости ( $t_R = 228,3$ );

– для обобщенного уравнения продолжительности процесса сушки казеина  $\tau$  – коэффициент корреляции ( $R = 0,94$ ) и критерий значимости ( $t_R = 520,55$ );

– для обобщенного уравнения предельного напряжения сдвига раствора казеина (20 %)  $P$  – коэффициент корреляции ( $R = 0,99$ ) и критерий значимости ( $t_R = 403,38$ ).

Таким образом, полученные обобщенные уравнения сушки казеина при инфракрасном и конвективном нагреве позволяют определить качество сухого казеина (12 %), определить расход энергии на сушку казеина, определить продолжительность процесса сушки, определить оптимальные параметры режима сушки; решить задачу оптимизации процесса, найти оптимальные конструктивные решения при проектировании сушильного аппарата.

Процесс сушки казеина при инфракрасном и конвективном нагреве исследовали с помощью критериев подобия теплообмена, были установлены основные закономерности и методы расчета параметров кинетики сушки, получены уравнения для определения времени сушки казеина, получены уравнения для определения температуры казеина в процессе сушки, получены уравнения для определения плотности теплового потока ИК - излучения в процессе сушки, представлено сопоставление расчетных и экспериментальных значений параметров сушки.

Радиационно-конвективная сушка казеина проводилась в экспериментальной установке (рис. 2) при режимах:

$$\begin{aligned} 1-t_3=100\text{ }^\circ\text{C}, h=15\text{ см}, d=0,4\text{ см}, q_{из}=2,02\text{ кВт/м}^2; \\ 2-t_3=140\text{ }^\circ\text{C}, h=15\text{ см}, d=1,2\text{ см}, q_{из}=3,97\text{ кВт/м}^2. t_{изл}=150\text{ }^\circ\text{C} \end{aligned}$$

где  $t_3$  – температура горячего воздуха в камере;  
 $h$  – расстояние от образца казеина до излучателей;  
 $d$  – толщина образца;  
 $q_{из}$  – плотность лучистого потока;  
 $t_{изл}$  – температура источника излучения.

Для расчета и исследования кинетики процесса сушки казеина и построения расчетных графических зависимостей воспользуемся критерием Больцмана :

$$Bo = \frac{\lambda}{\varepsilon_{пр} \times \zeta_0 \times T_{изл}^3 \times d}, \quad (15)$$

где  $\varepsilon_{пр}$  – степень черноты;  
 $\zeta_0$  – коэффициент излучения абсолютно черного тела,  $\zeta_0 = 5,67 \times 10^{-8}$  Вт/м<sup>2</sup>×К<sup>4</sup>;  
 $\lambda$  – коэффициент теплопроводности.

Критерий Больцмана ( $Bo$ ) для сухих образцов имеет вид:

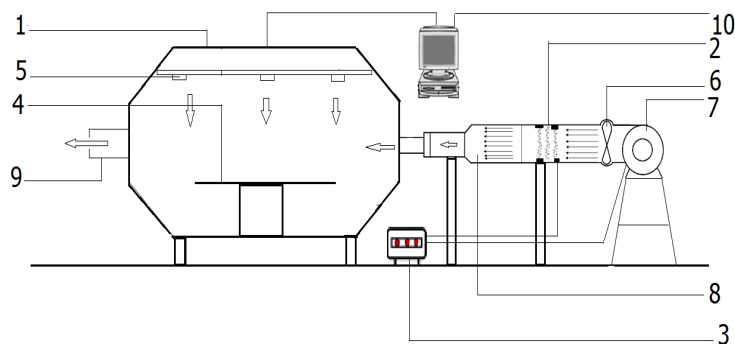
$$Bo_0 = \frac{\lambda_{сух}}{\varepsilon_{пр} \times \zeta_0 \times T_{изл}^3 \times d}, \quad (16)$$

где  $\lambda_{сух}$  – коэффициент теплопроводности влажного казеина.

Для влажного казеина критерий  $Bo_w$  :

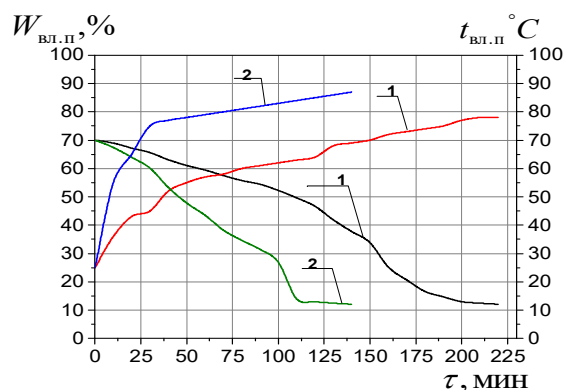
$$Bo_{вл.п} = \frac{\lambda_{вл.п}}{\varepsilon_{пр} \times \zeta_0 \times T_{изл}^3 \times d}, \quad (17)$$

где  $\lambda_{вл.п}$  – коэффициент теплопроводности влажного казеина.



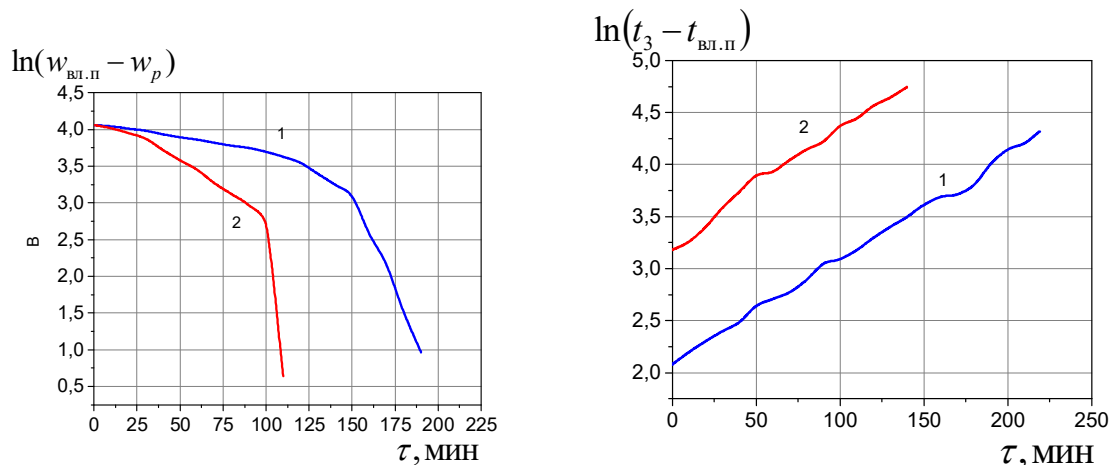
1 – нагревательная камера, 2 – электронагреватель, 3 – регулятор мощности, 4 – сушильный лоток, 5 – ИК-источник, 6 – вентилятор, 7 – воздуходувка, 8 – вход воздуха, 9 – выход воздуха, 10 – персональный компьютер

**Рисунок 2 – Экспериментальный стенд сушильного устройства**



Режимы сушки 1– $t_3=100\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $h=15\text{ см}$ ,  $d=0,4\text{ см}$ ,  $q_{из}=2,02\text{ кВт/м}^2$ ; 2–  $t_3=140\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $h=15\text{ см}$ ,  $d=1,2\text{ см}$ ,  $q_{из}=3,97\text{ кВт/м}^2$

**Рисунок 3 – Кривые  $W_{вл.п.}=f(t)$  и температурные кривые  $t_{вл.п.}=f(\tau)$  радиационно-конвективной сушки казеина**



Режимы сушки 1– $t_3=100\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $h=15\text{ см}$ ,  $d=0,4\text{ см}$ ,  $q_{из}=2,02\text{ кВт/м}^2$ ; 2– $t_3=140\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $h=15\text{ см}$ ,  $d=1,2\text{ см}$ ,  $q_{из}=3,97\text{ кВт/м}^2$

**Рисунок 4 – Зависимости  $\ln(w_{вл.п.} - w_p)$  и  $\ln(t_3 - t_{вл.п.})$  при радиационно-конвективной сушке казеина**

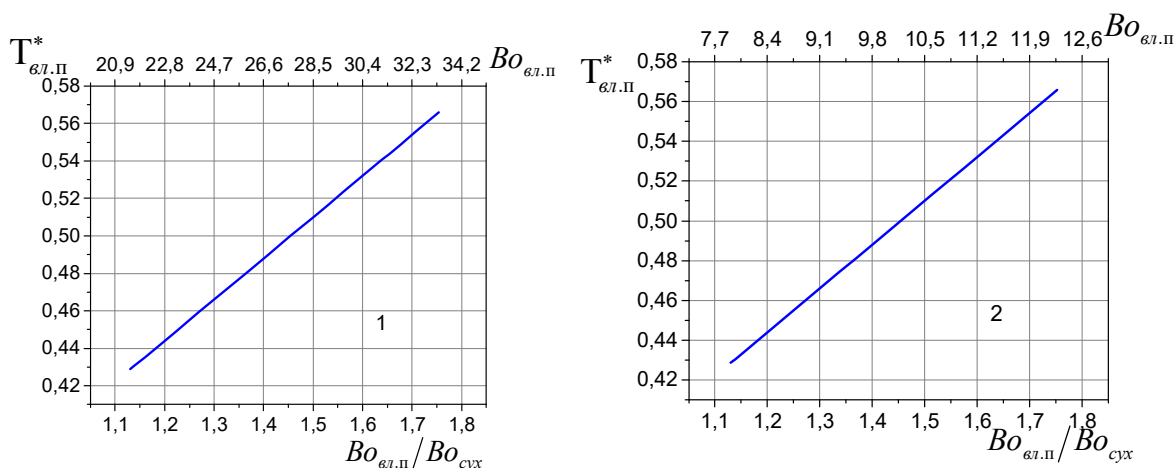


Рисунок 5 – Зависимости относительной температуры  $T_{вл.п}^*$  от отношения критериев  $Bo_{вл.п}/Bo_{сух}$  и  $T^* = \int(Bo_{вл.п})$  в процессе сушки казеина

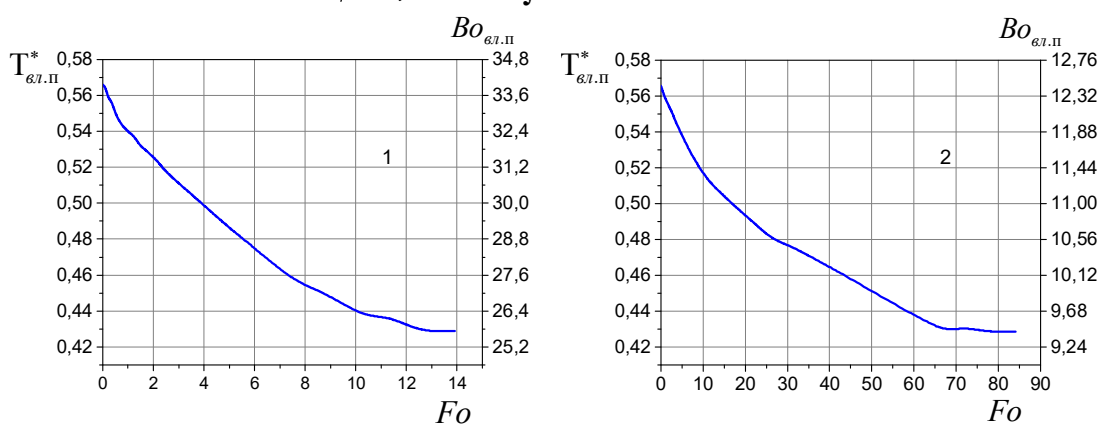


Рисунок 6 – Зависимости относительной температуры  $Bo_w = \int(Fo)$  и  $T_{вл.п}^* = \int(Fo)$  в процессе сушки

Для расчета продолжительности сушки используется следующая зависимость:

$$\bar{U} = \int(\tau) = \frac{W_{вл.п} - W_P}{W_n - W_P}, \quad (18)$$

где  $\bar{U}$  – безразмерное влагосодержание казеина;

$W_n, W_{вл.п}, W_P$  – начальное, текущее и равновесное влагосодержание казеина.

Из решения зависимости (18) время сушки находится:

$$\lg \bar{U} = \lg \frac{W_{вл.п} - W_P}{W_n - W_P} = f(\tau). \quad (19)$$

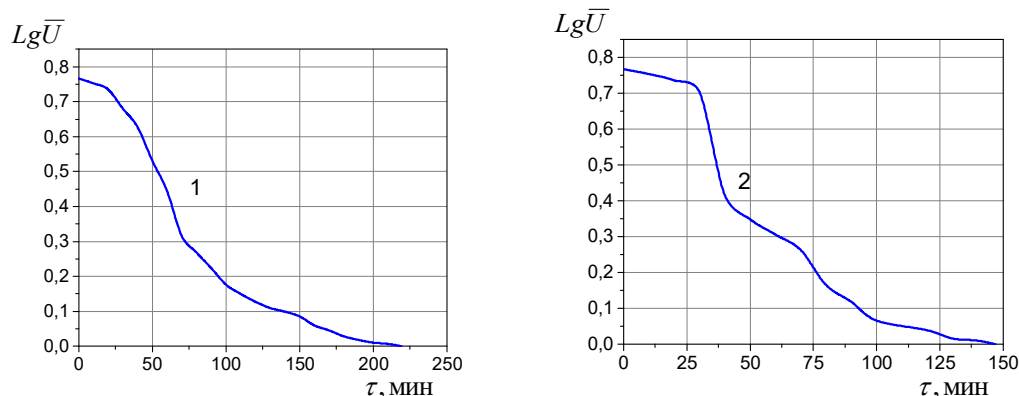
Было получено уравнение для определения продолжительности сушки:

$$\tau = -\frac{1}{k_{коф}} \times \lg \frac{W_{вл.п} - W_P}{W_n - W_P}. \quad (20)$$

где  $k_{коф}$  – коэффициент сушки,  $k_{коф} = 5 \times 10^{-3} \times W_n - 0,3$ .

На рисунке 7 представлена зависимость относительного влагосодержания  $Lg\bar{U} = \int(\tau)$  для процесса сушки казеина в форме пластины при

разных режимах ( $1-t_3=100^\circ\text{C}$ ,  $h=15\text{см}$ ,  $d = 0,4\text{ см}$ ,  $q_{из}=2,02\text{ кВт/м}^2$ ;  $2-t_3=140^\circ\text{C}$ ,  $h = 15\text{ см}$ ,  $d = 1,2\text{ см}$ ,  $q_{из}=3,97\text{ кВт/м}^2$ ).



**Рисунок 7 – Зависимость относительного влагосодержания  $Lg\bar{U} = \int(\tau)$  в процессе сушки казеина в форме пластины**

В процессе сушки казеина при инфракрасном и конвективном нагреве критерий *Больцмана*  $Bo_W$  и плотность теплового потока ИК-излучения являются функциями влагосодержания  $W_{вл.п}$  продукта.

С помощью уравнения *Стефана-Больцмана* установили связи критерия *Больцмана* и теплового потока ИК-излучения с влагосодержанием казеина,  $q_{изл} = \int(W_{вл.п})$ . Формула излучения *Стефана-Больцмана* имеет вид:

$$q_{изл} = \varepsilon_{пр} \times C_{из} \times \left(\frac{T_{изл}}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_{пов}}{100}\right)^4 \times \varphi \left(\frac{W_{вл.п}}{W_{кр}}\right)^{0,5}, \quad (21)$$

$$\varepsilon_{пр} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}. \quad (22)$$

где  $C_{из}$  – коэффициент излучения абсолютно черного тела;

$\varphi = 1$  – угловой коэффициент излучения;

$\varepsilon_{пр}$  – степень черноты системы излучатель–продукт.

Зависимость  $Bo_{вл.п} = \int(W_{вл.п})$  представлена на рисунке (8) выражается следующей формулой:

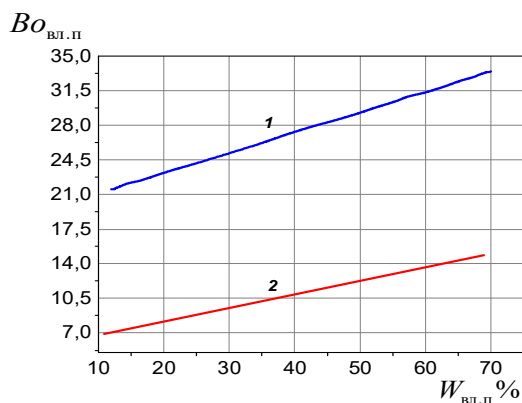
$$Bo_{вл.п} = 0,09 \times t_{вл.п} + 0,21 \times W_{вл.п}, \quad (23)$$

Зависимость  $q_{изл} = \int(W_{вл.п})$  представлена на рисунке (9) выражается следующей формулой:

$$q_{изл} = m.e \times (0,011 \times W_{вл.п}). \quad (24)$$

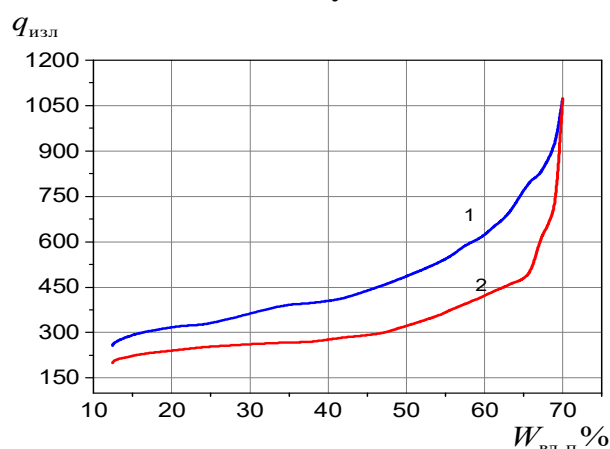
где  $m$  – константа вычисляется:

$$m = 10^3 \times \left(1,6 - 1,7 \times \frac{T_{н}}{T_{изл}}\right). \quad (25)$$



1- $t_3=100$  °C,  $h = 15$  см,  $d = 0,4$  см,  $q_{уз}=2,02$  кВт/м<sup>2</sup>; 2-  $t_3=140$  °C,  $h = 15$  см,  $d= 1,2$  см,  $q_{уз}= 3,97$  кВт/м<sup>2</sup>

**Рисунок 8 – Зависимость  $Bo_{вл.п} = \int(W_{вл.п})$  в процессе сушки казеина**



1- $t_3=100$  °C,  $h = 15$  см,  $d = 0,4$  см,  $q_{уз}=2,02$  кВт/м<sup>2</sup>; 2- $t_3=140$  °C,  $h = 15$  см,  $d= 1,2$  см,  $q_{уз}=3,97$  кВт/м<sup>2</sup>.

**Рисунок 9 – Зависимость  $q_{изл} = \int(W_{вл.п})$  в процессе сушки казеина**

Сравнение расчетных значений с экспериментальными данными позволяют сделать выводы о совпадении в пределах точности неоднократно приведенных опытов.

**Третья глава** посвящена математическому моделированию процессов сушки казеина сушки при комбинированном инфракрасном и конвективном нагреве (рис.1).

Разработаны математические модели методом интегральных преобразований Лапласа для решения задач распределения влажности и температуры в слоях казеина, средней влажности и температуры в слоях казеина, а также влажность и температура горячего воздуха в камере в первый и второй периоды сушки. Для проверки адекватности полученных математических моделей, экспериментально исследовали процесс сушки казеина при инфракрасном и конвективном нагреве. Для выполнения расчетов сушки казеина и проверки адекватности математических моделей находили равновесные, диффузионные, тепловые и гидродинамические параметры процесса при инфракрасном и конвективном нагреве. Совпадение экспериментальных результатов и полученных результатов с помощью разра-



ботанных математических моделей позволяет сделать вывод об адекватности модели реальному процессу сушки казеина.

В качестве примера приведем математическое описание массопереноса при сушке казеина. В период постоянной скорости сушки дифференциальное уравнение массопроводности с постоянным коэффициентом влагопроводности имеет вид:

$$\frac{\partial w(r, \tau)}{\partial \tau} = k \times \left[ \frac{\partial^2 w(r, \tau)}{\partial r^2} + \frac{\Gamma}{r} \times \frac{\partial w(r, \tau)}{\partial r} \right]; (\tau > 0; 0 \leq r \leq R), \quad (26)$$

где  $r$  – координата по толщине образцов казеина(м);

$\tau$  – время сушки(с);

$R$  – половина толщины продукта (м);

$k$  – коэффициент влагопроводности, м<sup>2</sup>/с;

$\Gamma$  – коэффициент = 0.

Для математического описания переноса влаги в слоях казеина в период постоянной скорости сушки запишем следующие уравнения:

– уравнение материального баланса в камере сушилки:

$$G_B \times \frac{dx_2}{d\tau} + G_{c.n} \times \frac{dw_{cp}}{d\tau} = L_e \times [x_3 - x_2], \quad (27)$$

где  $G_B = \rho_e \times V_B$  – плотность и объем воздуха, кг;

$G_{c.n}$  – масса влажного продукта, кг,  $G_{c.n} = \rho_{c.n} \times V_{c.n}$ ;

$x_2$  – влажность горячего воздуха камеры, кг/кг;

$x_3$  – влажность горячего воздуха на выходе из камеры, кг/кг;

$L_B$  – массовый расход воздуха, кг/с.

Уравнение для определения средней влажности в слое казеина:

$$w_{cp}(\tau) = \frac{\Gamma + 1}{R^{\Gamma+1}} \times \int_0^R r^\Gamma \times w(r, \tau) dr; \quad (28)$$

– начальные и граничные условия:

$$w(r, 0) = w_{cp}(0) = w_0; \quad (29)$$

$$x_2(0) = x_{2,0}; \quad (30)$$

$$\frac{\partial w(0, \tau)}{\partial r} = 0, w(0, \tau) \neq \infty \quad (31)$$

$$k \times \rho_{c.n} \times \frac{\partial w(R, \tau)}{\partial r} = \beta \times \rho_e \times [x_2(\tau) - x_{п.нас}(R, \tau)]; \quad (32)$$

где  $\beta$  – коэффициент массоотдачи в слое казеина (М×с<sup>-1</sup>).

Систему уравнений (26) – (32) запишем в безразмерном виде с использованием метода интегральных преобразований *Лапласа* для решения краевой задачи.

Затем найдем решения задач: распределение влажности в слоях казеина, средней влажности в слоях казеина и влажность горячего воздуха в камере:

– распределения влажности в слоях казеина:

$$w(r, \tau) = w_{kp} + A \times w_{kp} \times \left( \frac{x_0 - x_1}{x_1} \right) \times \cos \left( \sqrt{\delta_m} \times \frac{r}{R} \right) \times e^{-\delta \times \frac{k \times \tau}{R^2}} + \sum_{n=0}^{\infty} \frac{B_n \times w_{kp}}{r} \left[ \mu_n^2 \times \left( \frac{x_0 - x_1}{x_1} \right) + (\delta - \mu_n^2) \times \frac{x_{п.нас} - x_1}{x_1} \right] \times \cos \left( \mu_n \times \frac{r}{R} \right) \times e^{-\mu_n^2 \times \frac{k \times \tau}{R^2}}. \quad (33)$$

где  $A = \frac{Bi_m}{Bi_m \times \left( 1 + \frac{\sigma_m}{2} \right) \times \cos \sqrt{\delta_m} + \left[ \frac{Bi_m \times \sigma_m}{2\sqrt{\delta_m}} - \sqrt{\delta_m} \right] \times \sin \sqrt{\delta_m}},$

$$B_n = \frac{2Bi_m}{\left[ (1 + Bi_m) \times (\delta_m - \mu_n^2) - 2 \times \mu_n^2 + Bi_m \times \sigma_m \right] \times \left[ \sin \mu_n + \mu_n \times [\delta_m - \mu_n^2 + Bi_m \times (\sigma_m + 2)] \times \cos \mu_n \right]},$$

$\mu_n$  – корни характеристического уравнения

– уравнение для расчета средней влажности в слоях казеина в любой момент времени второго периода сушки

$$w(r, \tau) = w_{kp} + \frac{A}{\sqrt{\delta_m}} \times w_{kp} \times \left( \frac{x_0 - x_1}{x_1} \right) \times \sin \left( \sqrt{\delta_m} \right) e^{-\delta \times \frac{k \times \tau}{R^2}} + \sum_{n=0}^{\infty} \frac{B_n \times w_{kp}}{\mu_n^2} \left[ \mu_n^2 \times \left( \frac{x_0 - x_1}{x_1} \right) + (\delta - \mu_n^2) \times \frac{x_{п.нас} - x_1}{x_1} \right] \sin(\mu_n) e^{-\mu_n^2 \times \frac{k \times \tau}{R^2}}. \quad (34)$$

– Уравнение для расчета влажности горячего воздуха в камере:

$$x_2(\tau) = x_1 + (x_0 - x_1) \times \left[ \frac{A\sqrt{\delta} \times \sigma \times k \times \tau}{R^2} \div (\sin \sqrt{\delta_m} + 1) \right] e^{-\delta \times \frac{k \times \tau}{R^2}} + \sigma \times (x_0 - x_1) \times \sum_{n=1}^{\infty} \left( \frac{B_n}{\delta_m - \mu_n^2} \times \left[ \mu_n^2 + (\delta - \mu_n^2) \times \frac{x_{п.нас} - x_1}{x_0 - x_1} \right] \right) \times (\sin \mu_n) \left( e^{-\mu_n^2 \times \frac{k \times \tau}{R^2}} - e^{-\delta \times \frac{k \times \tau}{R^2}} \right). \quad (35)$$

Для проверки адекватности разработанных математических моделей реальному процессу были проведены экспериментальные исследования сушки казеина и в камерной сушилке (рисунок 2) при разных режимах.

В качестве примера приведем проверку адекватности разработанных математических моделей при режиме сушки  $t_3=100$  °С,  $h = 15$  см,  $d=0,4$  см,  $q_{из}=2,02$  кВт/м<sup>2</sup>. Для выполнения расчетов сушки казеина, с помощью разработанных математических моделей необходимо знать равновесные, диффузионные, тепловые и гидродинамические параметры процесса.

Коэффициент влагопроводности для I-го периода сушки  $k \cdot 10^8=5,86$  м<sup>2</sup>/с и для II-го периода сушки  $k \cdot 10^8=2.17$  м<sup>2</sup>/с; удельная теплоемкость казеина  $c = 3888$  Дж/(кг·К); коэффициент теплопроводности казеина  $\lambda = 0,70$  Вт/(м·К); коэффициент температуропроводности сушки  $a \cdot 10^8=15,79$  м<sup>2</sup>/с; толщина образца  $R=0,4$  см; площадь поверхности образца  $S_n=0,125$  м<sup>2</sup>; энергия, поглощенная материалом при облучении  $Q_{ноз}=341,9$ , Дж; температура продукта при ИК  $t_{из}=49,18$  °С; расход теплоты на нагрев казеина при ИК-излучении  $dQ_{вл.п.из}=1,88$ , Дж; потери теплоты нагреваемым телом при ИК-излучении (воздуха) окружающего материала  $dQ_{в.из}=89,5$  Дж;

расход теплоты на испарение влаги из казеина  $dQ_{исп}=486,60$ , Дж; теплоотдача и массоотдача для плоской поверхности

$$Nu_t = 2 + A_1 Re^{n_1} pr^{0,33} Gu^{m_1}, \quad Nu_m = 2 + A_2 Re^{n_2} pr^{0,33} Gu^{m_2}, \quad (36)$$

где  $A_1, A_2, n_1, n_2$ , –коэффициенты:

	$A_1$	$n_1$	$A_2$	$n_2$
$Re=(1-2) \cdot 10^2$	1,07	0,48	0,83	0,53
$Re=(3,15-22) \cdot 10^3$	0,51	0,61	0,49	0,61
$Re=(2,2-31,5) \cdot 10^4$	0,0027	0,90	0,25	0,90

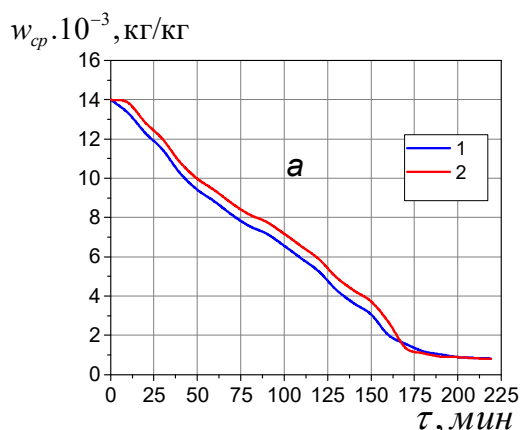
Теплоотдача между движущимся горячим воздухом и стенками камеры, между влажным воздухом и поверхностью электрокалорифера:

$$Nu_t = 0,032 \times Re^{0,8}; \quad (37)$$

Теплоотдача от поверхности изоляции сушилki в окружающую среду:

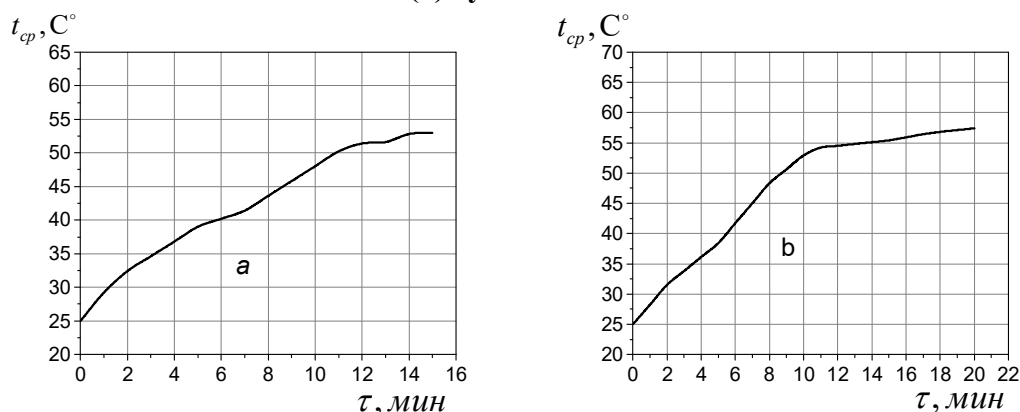
$$\alpha_{o.c} = 9,74 + 0,07 \times \Delta t; \quad (38)$$

где  $\Delta t$  – разность температур поверхности сушилki и окружающего воздуха.



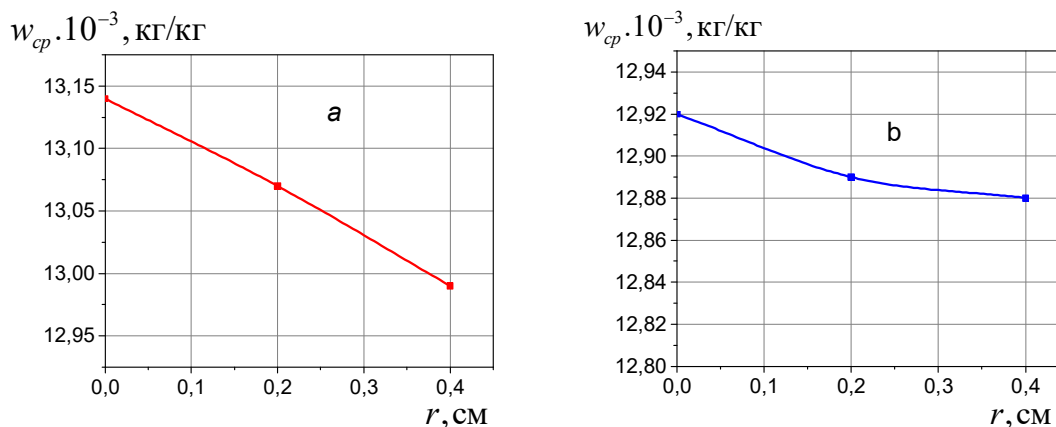
Режим сушки: а–  $t_3=100^\circ\text{C}$ ,  $h = 15$  см,  $2R= 0,4$  см,  $q_{из}=2,02$  кВт/м<sup>2</sup>

**Рисунок 10 – Сравнение расчетных кривых (2) и экспериментальных данных (1) сушки частиц казеина**



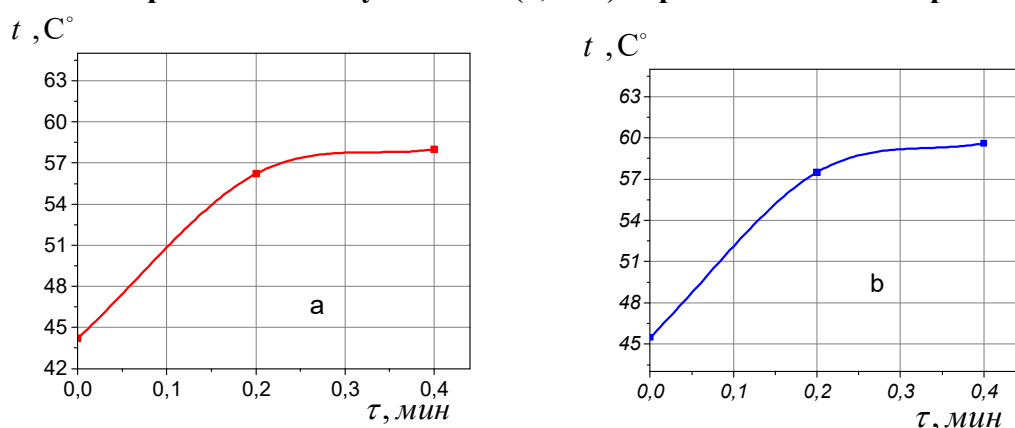
Режим сушки: а–  $t_3=100^\circ\text{C}$ ,  $h = 15$  см,  $2R= 0,4$  см,  $q_{из}=2,02$  кВт/м<sup>2</sup>

**Рисунок 11 – Сравнение экспериментальных данных (a) расчетных (b) температурных кривых нагрева частиц казеина**



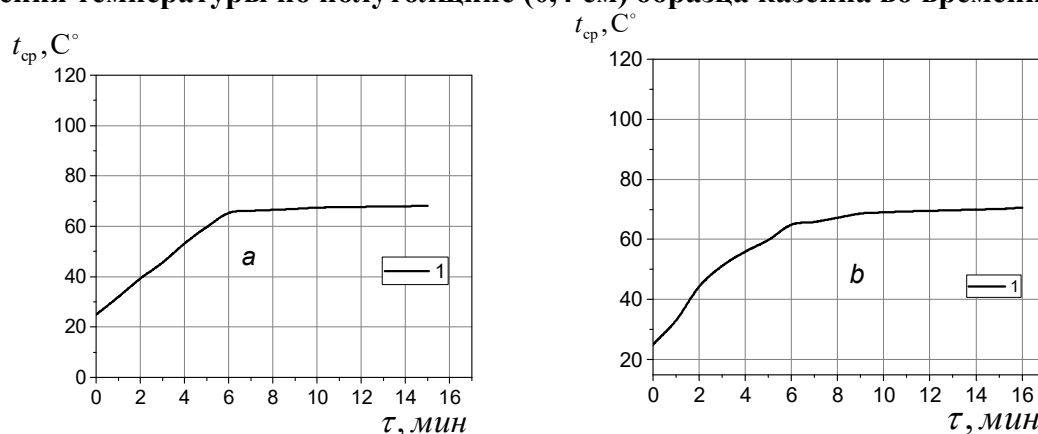
Режим сушки:  $t_3=100^\circ\text{C}$ ,  $h = 15 \text{ см}$ ,  $q = 2,02 \text{ кВт/м}^2$

Рисунок 12 – Сравнение экспериментальных данных (а) расчетных(б) распределения влагосодержания по попутолщине (0,4 см) образца казеина по времени сушки



Режим сушки:  $t_3=100^\circ\text{C}$ ,  $h = 15 \text{ см}$ ,  $q=2,02 \text{ кВт/м}^2$

Рисунок 13 – Сравнение экспериментальных данных (а) расчетных(б) и распределения температуры по попутолщине (0,4 см) образца казеина во времени сушки



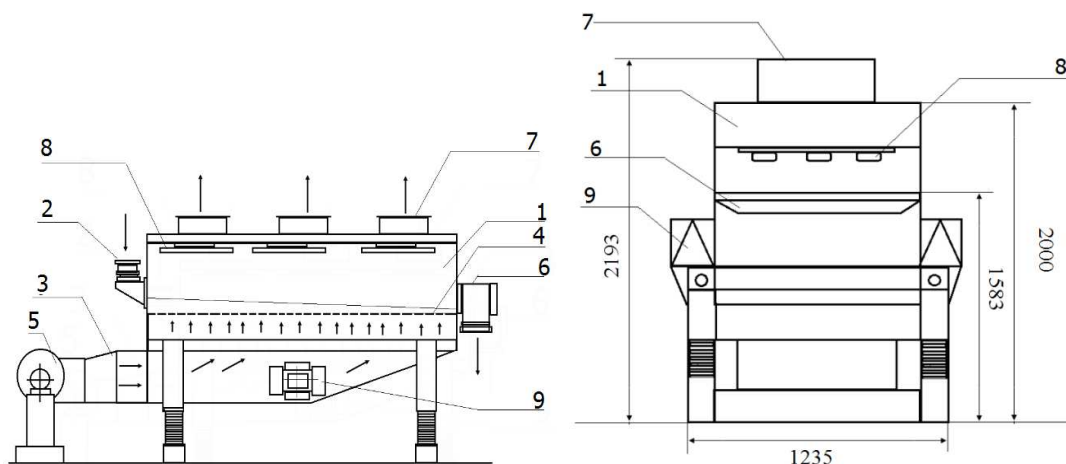
Режим сушки:  $a- t_3=100^\circ\text{C}$ ,  $h = 15 \text{ см}$ ,  $2R= 0,4 \text{ см}$ ,  $q_{из} = 2,02 \text{ кВт/м}^2$

Рисунок 14 – Сравнение экспериментальных данных (а), расчетных (б) температуры горячего воздуха внутри в камере

**Четвертая глава** посвящена вопросам практической реализации сушки казеина в производстве и оптимальных конструктивных элементов сушильного аппарата.

Приводятся методика расчета камерной сушилки, а также рекомендации по использованию результатов проведенных исследований на ряде предприятий молочной промышленности. Разработаны конструкции радиационно-конвективных установок для сушки казеина: конвекционная ленточная сушилка с комбинированным инфракрасным подводом теплоты, сушилка виброаэрокипящего слоя с использованием ИК-нагрева, сушилка фонтанирующего слоя с использованием ИК-нагрева.

В качестве примера приведем конструкцию сушилки виброаэрокипящего слоя с использованием ИК-нагрева.



**Рисунок 15– Сушилка виброаэрокипящего слоя с использованием ИК-нагрева для сушки казеина**

Установка состоит из сушильной камеры(1); электронагревателя и воздуходувки (5); источника инфракрасного излучения(8); источника вибраций (вибраторы) (9); патрубка для ввода влажного казеина(2); патрубка для ввода горячего воздуха(3); газораспределительной решетки (4); патрубка для выгрузки высушенного казеина (6); патрубка вывода отработанного теплоносителя(7).

Анализ технических характеристик предлагаемых сушилок и промышленной сушилки свидетельствует о том, что использование комбинированного конвективного и инфракрасного подвода теплоты в сравнении с существующим способом, уменьшают удельный расход пара на 1 кг испаренной влаги и удельный расход электроэнергии на 1 кг испаренной влаги. Это позволило повысить производительность сушилки до 137 кг сухого продукта в час. В реальных производственных условиях достигнута влажность казеина сырца, направляемого на сушку до 70 % – 60 %, повышается производительность сушилки до 120 кг сухого продукта в час при температуре теплоносителя 100°C.

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

По результатам теоретических и экспериментальных исследований были сделаны следующие выводы:

1. В результате анализа современных конструкций сушилок и использованных методик расчета разработаны проектные конструктивные решения конвективной ленточной сушилки, установок виброаэрокипящего и фонтанирующего слоя с комбинированным инфракрасным подводом теплоты, позволяющие повысить эффективность процесса сушки казеина.

2. Разработана физическая модель процесса сушки казеина при комбинированном инфракрасном и конвективном нагреве.

3. Предложена иерархическая структура для моделирования и оптимизации процесса сушки казеина при инфракрасном и конвективном нагреве.

4. Разработана структурно-параметрическая модель сушки казеина при инфракрасном и конвективном нагреве для диагностики и прогнозирования эффективности процесса сушки;

5. Определены рациональные параметры режима сушки и оптимальные конструктивные решения при проектировании сушильного аппарата.

6. Разработаны математические модели, позволяющие определить рациональные параметры режима сушки и оптимальные конструктивные решения при проектировании сушильных аппаратов.

7. Исследован процесс сушки казеина при комбинированном инфракрасном и конвективном нагреве с использованием критериев подобия теплообмена.

8. Установлены основные закономерности и методы расчета параметров кинетики сушки казеина.

9. Проведены экспериментальные исследования реологических показателей сухого казеина.

10. Разработаны математические модели для решения задач распределения влажности и температуры в слоях казеина, средней влажности и температуры в слоях казеина, влажности и температуры горячего воздуха в камере в первый и второй периоды сушки.

11. Предложены проектные конструктивные решения конвективной ленточной сушилки, установок виброаэрокипящего и фонтанирующего слоя с комбинированным инфракрасным подводом теплоты, позволяющие повысить эффективность процесса сушки казеина.

12. Научные и прикладные результаты исследований позволили разработать рекомендации для внедрения на действующем предприятии ООО МИП «ИЦ БиоПищеМаш» оборудование для хранения и переработки сельхозпродукции.

#### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНО В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:**

##### **Публикации в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК:**

1. Малази, С.А. Моделирование теплопереноса процесса сушки казеина с учетом изменения структурно-механических свойств при комбини-

рованном инфракрасном и конвективном нагреве/С.А.Малази, М.А.Беляева// Пищевая промышленность. – 2020. – № 8. – С. 60-63. – 0,50 печ. л. – авт. 0,25 печ. л.

2. Малази, С.А. Иерархическая структура анализа процесса сушки кисломолочных продуктов/С.А.Малази, М.А.Беляева //Пищевая промышленность. – 2019. – № 1. – С. 24-27. – 0,50 печ. л. – авт. 0,25 печ. л.

3. Малази, С.А. Математическая модель процесса сушки кисломолочных продуктов с использованием инфракрасного и конвективного методов нагрева/С.А.Малази, М.А.Беляева //Пищевая промышленность. – 2019. – № 10. – С. 89-92. – 0,50 печ. л. – авт. 0,25 печ. л.

#### **Публикации, индексируемые в Web of Science:**

4. Малази, С.А. Оптимизация и аппаратурное оформление инфракрасной сушки национального кисломолочного продукта (курта)/С.А.Малази, М.А.Беляева //Хранение и переработка сельхозсырья. – 2017. –№ 10. – С. 41-44. – 0,47 печ. л. – авт. 0,25 печ. л.

#### **Публикации, индексируемые в Scopus:**

5. Malazi, A.S. Establishing an Effective System for the Introduction of Vending Technologies in the Consumer Market and in University Catering/M.Belyaeva, A.Gazhur, V.Perov, S.A.Malazi, O.Lukhovskaya // Digital Future Economic Growth, Social Adaptation, and Technological Perspectives.–2020. – 353-362 p. – 0,66 печ. л – авт. 0,25 печ. л.

#### **Статьи в сборниках научных трудов, материалах конференций**

6. Малази, С.А. Моделирование массообменного процесса сушки казеина с учетом изменения структурно-механических свойств при комбинированном инфракрасном и конвективном нагреве/С.А.Малази // Современные инновационные технологии в экономике, науке, образовании: материалы Третьей Международной научно-практической конференции. – Москва: РЭУ им. Г.В.Плеханова, 2020. – С. 153-168. – 0,93 печ. л.

7. Малази, С.А. Инновационные применения инфракрасной обработки пищевых продуктов/С.А.Малази // Современные инновационные технологии в экономике, науке, образовании: материалы Второй Международной научно-практической конференции. –Москва: РЭУ им. Г.В. Плеханова, 2019. – С. 424-438. – 0,45 печ. л.

8. Малази, С.А. Системный анализ процесса инфракрасной сушки молочных продуктов/С.А. Малази, М.А. Беляева //Экономически эффективные и экологически чистые инновационные технологии: материалы Пятой Международной научно-практической конференции. –Москва: РЭУ им. Г.В. Плеханова, 2019. – С. 63-73. – 0,35 печ. л. – авт. 0,18 печ. л.

9. Малази, С.А. Моделирование процесса сушки кисломолочных продуктов/С.А.Малази//Современные инновационные технологии в экономике, науке, образовании: материалы второй Международной научно-

практической конференции.–Москва: РЭУ им. Г.В. Плеханова, 2019. – С. 499-511. – 0,46 печ. л.

10. Малази, С.А. Омический процесс нагрева - как альтернативная технология обработки пищевых продуктов/С.А.Малази // Инновации: перспективы, проблемы, достижения: материалы Шестой Международной научно-практической конференции. –Москва: РЭУ им. Г.В.Плеханова, 2018. – С. 167-179. – 0,51 печ. л.

11. Малази, С.А. Физические принципы и практическая значимость инфракрасного нагрева продуктов питания/С.А.Малази, М.А.Беляева // Траектории развития: материалы Первой Международной научной конференции. – Москва: РЭУ им. Г.В. Плеханова, 2018. – С. 584-597. – 0,41 печ. л. – авт. 0,21 печ.л.

12. Малази, С.А. Изучение влияния сывороточных белков и условий хранения на физико-химические свойства йогурта изготовленного из сухих компонентов/С.А.Малази, М.А.Беляева//Экономически эффективные и экологически чистые инновационные технологии: материалы Третьей Международной научно-практической конференции. –Москва: РЭУ им. Г.В. Плеханова, 2017. – С. 125-137. – 0,40 печ. л. – авт. 0,20 печ. л.

13. Малази, С.А. Изучение влияния условий хранения на структурно-механические характеристики йогурта/С.А.Малази, М.А.Беляева // Инновации: перспективы, проблемы, достижения: материалы Пятой Международной научно-практической конференции. – Москва: РЭУ им. Г.В. Плеханова, 2017. – С. 181-198. – 0,57 печ. л. – авт. 0,29 печ. л.

14. Малази, С.А. Исследование и анализ влияния гомогенизации на процесс гелеобразования и свойства кисломолочных сгустков/С.А.Малази, М.А.Беляева // Экономически эффективные и экологически чистые инновационные технологии: Третья Международная научно-практическая конференция. – Берлин: Вест- Ост- Ферлаг, 2017. – С. 213-220. – 0,32 печ. л. – авт. 0,16 печ. л.

15. Малази, С.А. Влияние ультразвуковой обработки на реологические и функциональные свойства пищевых продуктов/С.А.Малази, М.А.Беляева // Современные инновационные технологии в экономике, науке, образовании: материалы Первой Международной научно-практической конференции. – Москва: РЭУ им. Г.В. Плеханова, 2018. – С. 268-280. – 0,40 печ. л. – авт. 0,20 печ. л.

#### **Патент на изобретения:**

16. Малази,С.А. Патент № 2743871 Российская Федерация, F26D3/30, A23C1/00, A23C19/076. «Шкаф для инфракрасной сушки национального кисломолочного продукта курта» заявка № 2018106945 от 26.02.2018/Малази С.А., Беляева М.А.